

# Introdução aos Elementos de Máquinas PMR3320

## Comentários Iniciais

Professor:

Ronaldo Carrion – [rcarrion@usp.br](mailto:rcarrion@usp.br)



**Programa do Curso e Cronograma (1º sem. 2019)**

**Critério de avaliação**

**Bibliografia**

Arquivo disponível no Moodle

**Horário das aulas**

4ª Feira 10:10 às 11:50

Sala: XXX

**Horário de atendimento**

4ª Feira

15:00 às 16:00



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE PETRÓLEO  
PMR3320 – INTRODUÇÃO AOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS  
1º SEMESTRE DE 2019  
PROF. RONALDO CARRION



Programação das aulas, datas e tópicos abordados.

Aula	Data	Tópico
<b>Fevereiro</b>		
1	20/02	Semana de Recepção dos Calouros
2	27/02	Apresentação do curso e critérios de avaliação Fadiga dos Materiais
<b>Março</b>		
	06/03	Não há aula – Quarta-feira de Cinzas
3	13/03	Fadiga dos Materiais
4	20/03	Fadiga dos Materiais
5	27/03	Eixos
<b>Abril</b>		
6	03/04	Eixos
7	10/04	Eixos
	17/04	Não há aula – Semana Santa
8	24/04	Prova 1
<b>Maio</b>		
	01/05	Não há aula – Dia do Trabalho
9	08/05	Chavetas
10	15/05	Chavetas
11	22/05	Mancais de Rolamento
12	29/05	Mancais de Rolamento
<b>Junho</b>		
13	05/06	Mancais de Rolamento
14	12/06	Prova 2
15	19/06	Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos - Apresentação
16	26/06	Recuperação

Observação:

❖ Não há prova substitutiva.

#### Bibliografia

##### ➤ Básica:

- NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas – uma abordagem integrada*, 4ª.ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2013.
- SHIGLEY, J. F.; MISCHE, C. R.; BUDYNAS, R. G. *Projeto de Engenharia Mecânica*. 7ª. ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2004.

##### ➤ Complementar:

- COLLINS, J. A. *Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: uma perspectiva de prevenção da falha*. 1ª.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. *Fundamentals of Machine Component Design*. 4th edition: John Wiley & Sons, 2005.
- SHIGLEY, J. F.; MISCHE, C. R. *Mechanical Engineering Design*. 7th edition: McGraw-Hill, 2003.
- NIEMANN G.; *Elementos de Máquinas*. São Paulo: Edgard Blucher, 2002, v.1.
- NIEMANN G.; *Elementos de Máquinas*. São Paulo: Edgard Blucher, 2002, v.2.
- NIEMANN G.; *Elementos de Máquinas*. São Paulo: Edgard Blucher, 2002, v.3.

#### Critério de avaliação

$$M = (P1 + P2)/2$$

Sendo  $M$  = média final

Para

$$\begin{aligned} M \geq 5,0 & \Rightarrow \text{aprovado} \\ 3,0 \leq M < 5,0 & \Rightarrow \text{recuperação} \\ M < 3,0 & \Rightarrow \text{reprovado} \end{aligned}$$

Caso faça recuperação

$$M_R = M + P_R$$

Sendo  $M_R$  = média final após a recuperação



# Introdução aos Elementos de Máquinas

## PMR3320

### Aula 1

### Revisão – Critérios de Resistência



<b>1. Introdução</b>	<b>2. Materiais Dúcteis</b> <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	<b>3. Materiais Frágeis</b> <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	<b>4. Exercícios</b>
----------------------	---	---	----------------------

## 1. Introdução

Falhas dependem:

- ❖ tipo de esforço  
→ tração, compressão ou cisalhamento
- ❖ tipo de carregamento  
→ estático ou dinâmico
- ❖ presença ou não de trinca no material



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

Ensaio de tração uniaxial:  
Existem tensão normal e  
de cisalhamento



Qual tensão causa a falha?

Esquema do ensaio  
e círculo de Mohr



lousa



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

Em geral: {

- ❖ Materiais **dúcteis** falham por exceder a tensão de **cisalhamento**
- ❖ Materiais **frágeis** falham por exceder a tensão **normal**

portanto

Diferentes teorias de falha para diferentes classes de materiais



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

Mais um comentário, antes de falar sobre as teorias de falhas:

Quando o carregamento é **dinâmico**, a distinção entre o comportamento **frágil e dúctil desaparece**



materiais dúcteis falham de maneira frágil

Por isso vamos considerar **separadamente** falha **estática e dinâmica**



<b>1. Introdução</b>	<b>2. Materiais Dúcteis</b> <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	<b>3. Materiais Frágeis</b> <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	<b>4. Exercícios</b>
----------------------	---	---	----------------------

## 2. Falhas de Materiais Dúcteis sob Carregamento Estático

Falha = atingir o escoamento



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

## ❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)

**deformação** = deslizamento relativo dos átomos na estrutura cristalina



deslizamento é causado pela tensão de cisalhamento e acompanhado pela **distorção** na forma



A energia acumulada na peça devido à **distorção** é um indicador da magnitude da **tensão de cisalhamento**



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

## □ Componentes da energia de **deformação**

$$U = U_h + U_d$$

$U$  = energia total de **deformação**

$U_h$  = energia de **dilatação**  $\Rightarrow$  muda o volume

$U_d$  = energia de **distorção**  $\Rightarrow$  muda a forma

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \left[ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3 \right]$$



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

Critério de falha: comparar  $U_d$  com  $U_{d_{uni}}$

$U_{d_{uni}}$  = ensaio de tração uniaxial

A tensão de falha adotada será a tensão de escoamento  $S_y$

No ensaio  $\Rightarrow \sigma_1 = S_y \quad \sigma_2 = 0 \quad \sigma_3 = 0$

$$U_{d_{uni}} = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2$$



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

## Tensão efetiva de von Mises ( $\sigma'$ )

$\sigma' \Rightarrow$  tensão de **tração uniaxial** que criaria a mesma energia de **distorção** que a criada pela **combinação de tensões**

Aplicando o critério de falha

$$\sigma'^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3$$

Critério de falha: comparar  $\sigma'$  com  $S_y$



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

## ❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)

“ a falha ocorre quando a tensão máxima de cisalhamento em uma região excede a tensão máxima de cisalhamento de um corpo de prova sob tração em escoamento (metade da tensão normal de escoamento)”

Fazer o círculo de Mohr na lousa

$S_{ys}$  = tensão de cisalhamento no escoamento

A falha ocorre quando  $\Rightarrow S_{ys} = 0,5 S_y$



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

### 3. Falhas de materiais frágeis sob carregamento estático

Falha = ruptura

Ruptura **frágil** sob tração se deve apenas à **tensão normal**  $\Rightarrow$  a teoria da máxima tensão normal é aplicável

Ruptura frágil sob compressão se deve à uma combinação de tensão normal (compressão) e tensão de cisalhamento  $\Rightarrow$  requer uma teoria de falha diferente

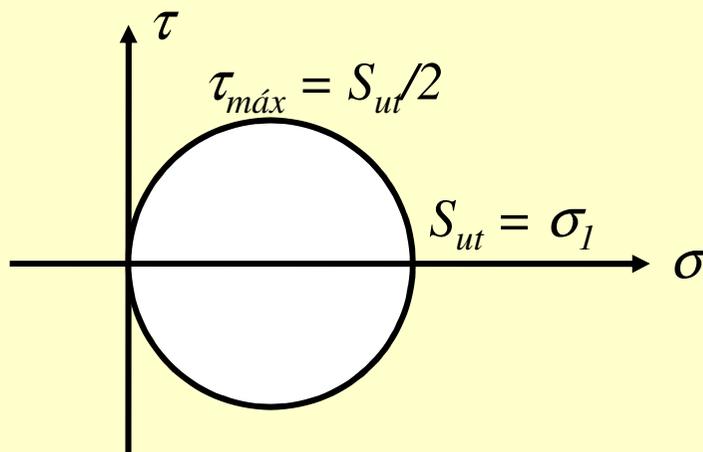
Para responder por todas as condições de carregamento, é usada uma combinação de teorias



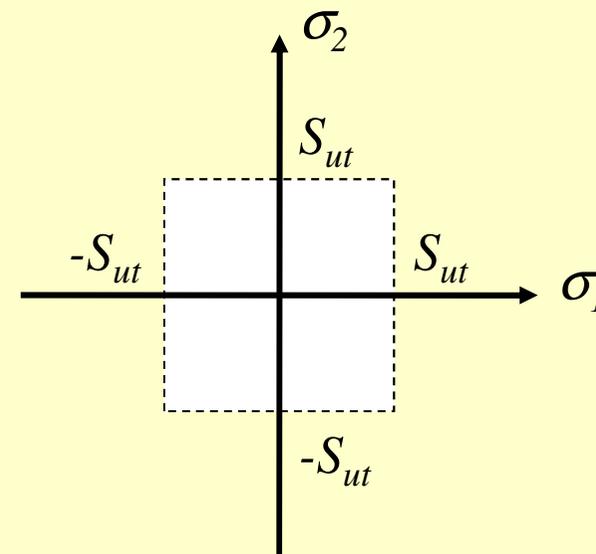
1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

## ❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)

Círculo de Mohr – ensaio de tração uniaxial



Materiais uniformes

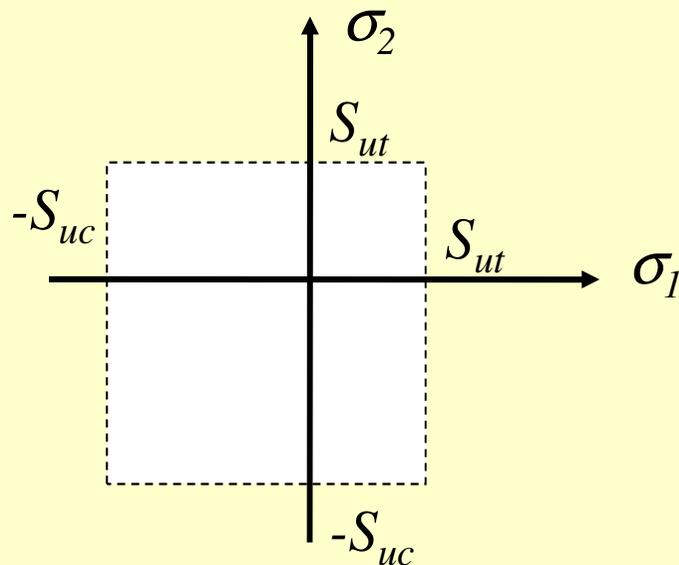


$$\sigma_1 = S_{ut} \quad \text{ou} \quad \sigma_2 = -S_{ut} \quad \Rightarrow \text{FALHA!}$$



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

## Materiais não uniformes



Experimental



1° e 3° quadrantes  $\Rightarrow$  ok!

2° e 4° quadrantes  $\Rightarrow$  falha dentro do polígono

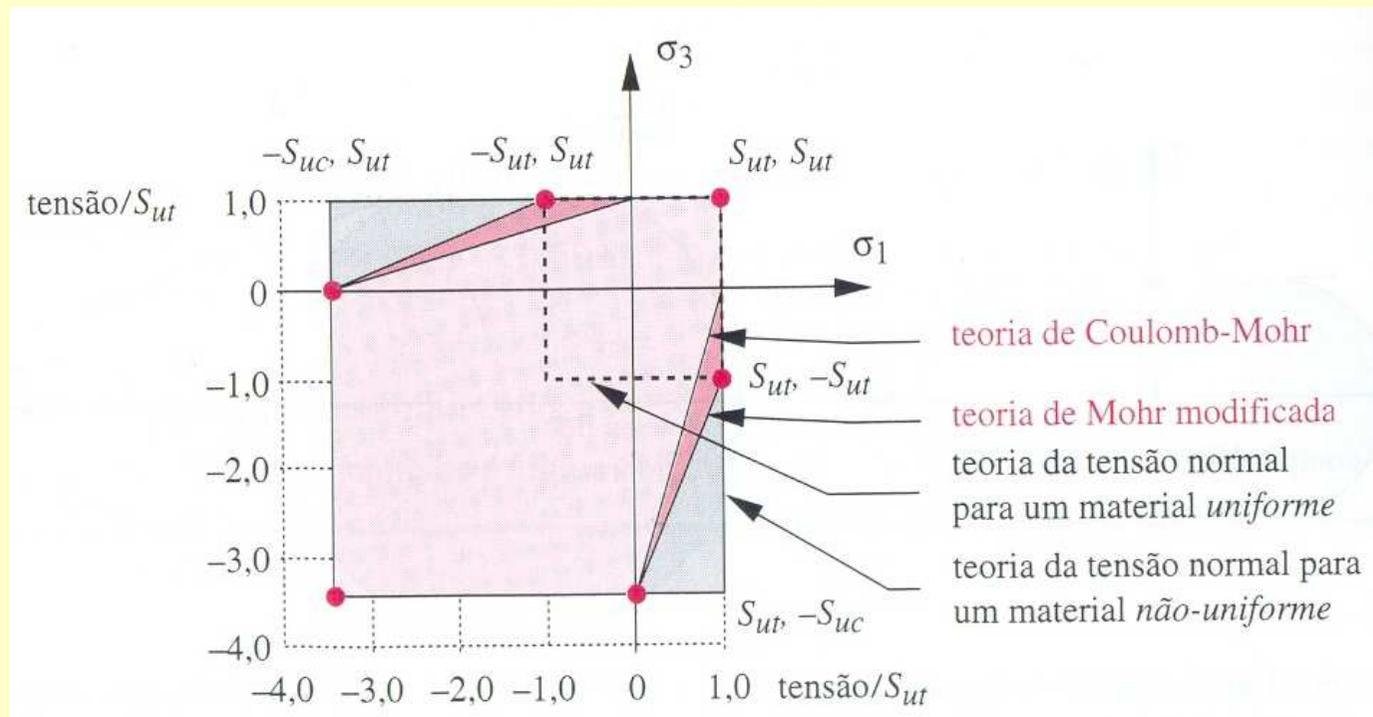


criar uma nova teoria



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorsão (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

## ❖ Teoria de Coulomb-Mohr

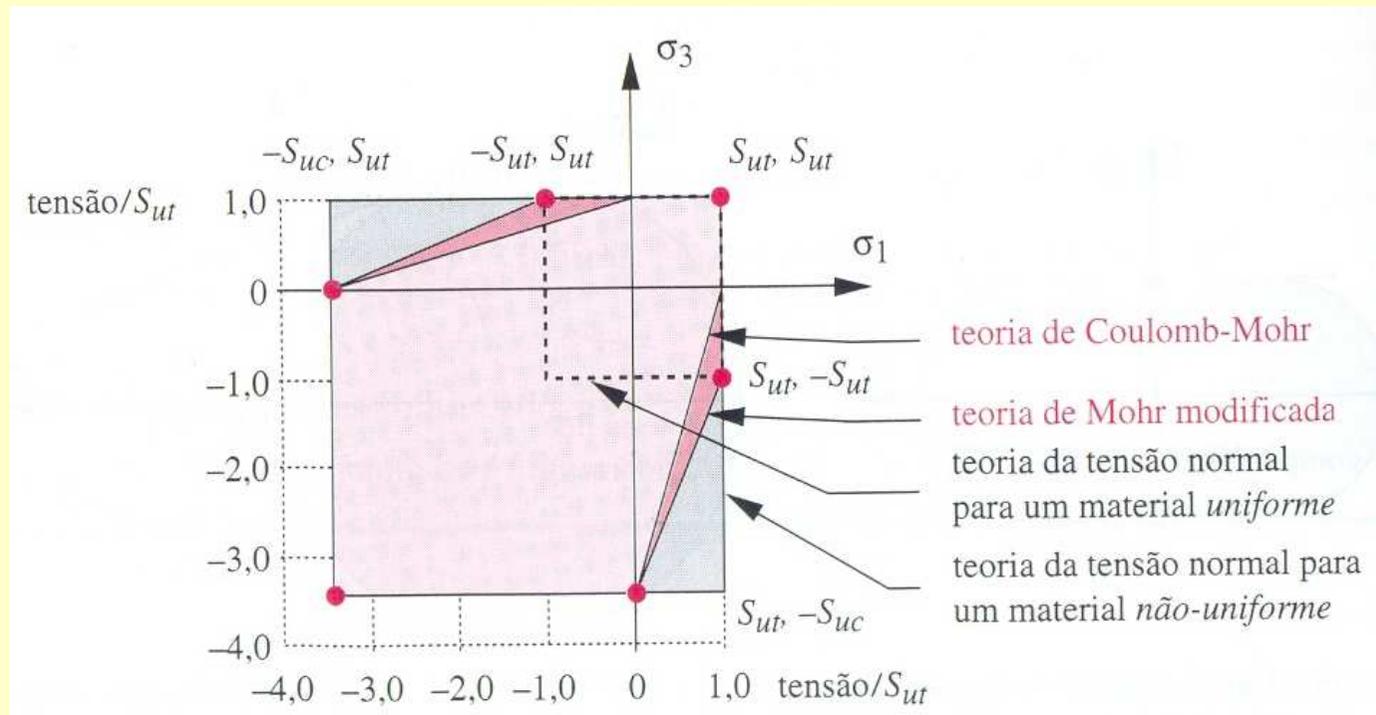


Dados experimentais  $\Rightarrow$  criou-se um outro método



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorção (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercícios
---------------	--	--	---------------

### ❖ Teoria de Mohr modificada



**Teoria recomendada para materiais frágeis não uniformes sob carregamento estático**



1. Introdução	2. Materiais Dúcteis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Energia de Distorsão (von Mises)</li><li>❖ Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento (Tresca)</li></ul>	3. Materiais Frágeis <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Teoria da Máxima Tensão Normal (Rankine)</li><li>❖ Teoria de Coulomb Mohr</li><li>❖ Teoria de Mohr Modificada</li></ul>	4. Exercício
---------------	--	--	--------------

## 4. Exercício

<b>Problema</b>	Determine os coeficientes de segurança para o suporte do tirante mostrado na Figura 5-9, baseado tanto na teoria da energia de distorção como na teoria da máxima tensão de cisalhamento e compare-os.
<b>Dados</b>	O material é alumínio 2024-T4 com tensão de escoamento de 47000 psi. O comprimento da haste é $l = 6$ in e do braço $a = 8$ in. O diâmetro externo da haste é $d = 1,5$ in. A força é $F = 1000$ lb.
<b>Hipóteses</b>	O carregamento é estático e o conjunto está a temperatura ambiente. Considere o cisalhamento devido à força cortante, assim como outras tensões.

O alumínio 2024-T4 é material dúctil

<b>Dados</b>	O material é ferro fundido cinzento classe 50 com $S_{ut} = 52500$ psi e $S_{uc} = -164000$ psi. O comprimento da haste é $l = 6$ in e do braço, $a = 8$ in. O diâmetro externo da haste é $d = 1,5$ in. A força $F = 1000$ lb.
<b>Hipóteses</b>	O carregamento é estático e o conjunto está na temperatura ambiente. Considere o cisalhamento devido à força cortante, assim como as outras tensões.

O *fofo* cinzento é um material frágil

Fonte: NORTON, R. L. *Projeto de máquinas – uma abordagem integrada*, 2ª.ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2004.

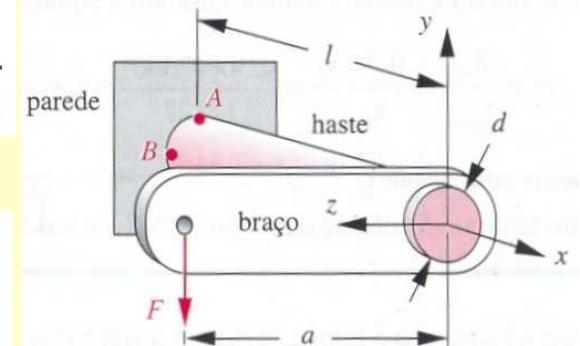


Figura para os dois casos



## PERGUNTAS?

